

흐름 경사면의 경사도에 따른 토석류 흐름의 특성 분석

이준선 · 송창근* · 이승오†

홍익대학교 토목공학과 · *인천대학교 안전공학과
(2015. 11. 16. 접수 / 2016. 2. 23. 수정 / 2016. 2. 28. 채택)

Analysis of Characteristic of Debris Flow with Angle of Slope

Jun Seon Lee · Chang Geun Song* · Seung Oh Lee†

Department of Civil Engineering, Hongik University

*Department of Safety Engineering, Incheon National University

(Received November 16, 2015 / Revised February 23, 2016 / Accepted February 28, 2016)

Abstract : In Korea, there exist many mountains, and sudden storms occur during the summer season. When severe rainstorm events occur in steep slope topography, risk of debris flow is increased. Once debris flow occurs in urban area, it may cause casualties and physical damages due to rapid debris flow velocity along a steep slope. Accordingly, preventing method of sediment-related disaster for damage mitigation are essential. Recently, various studies on debris flow have been conducted. However, the prediction of the physical propagation of debris flow along the steep slope was not thoroughly investigated. Debris flow is characterized by various factors such as topography, properties of debris flow, amount of debris flow. In the study the numerical simulation was focused on the topographic factor. Fundamental analysis of the risk area was implemented with emphasis on the propagation length, thickness, and the development of maximum velocity. The proposed results and the methodology of estimating the structural vulnerability would be helpful in predicting the behavior and the risk assessment of debris flow in urban area. These results will be able to estimate the vulnerability of urban areas affected the most damage by debris flow.

Key Words : debris flow, FLO-2D, structural vulnerability, land slope

1. 서론

급경사지 지형에 집중호우가 빈번하게 발생하는 경우 토석류 발생 위험도가 높아져 최근 다양한 연구가 진행되고 있다. 우리나라도 산지가 많고 여름철 급격한 강우가 오는 특징이 있어 토사재해저감을 위한 선제적 예방 조치가 필수적이다. 토석류는 물과 토사의 혼합체가 중력을 받아 유체의 흐름으로 거동하는 현상을 말한다. 따라서 토석류는 고체와 유체의 두 가지 성질을 가지고 있으며 유동성 흐름을 가지고 흐르는 특징이 있다. 국내에서 토석류 발생은 급격한 강우가 발생하는 우기에 집중되고 있으며, 산지의 토심이 얇은 지역에서 발생하는 표층붕괴가 주를 이루고 있다는 특징이 있다. 토석류의 흐름은 다른 토사재해에 비해 유속이 빨라서 심각한 인명 및 재산 피해를 발생시키며 구조물을 붕괴시킬 정도의 파괴력을 가지기도 한다.

토석류의 피해양상은 다양하게 발생하며 건물이 붕괴되기도 하지만 토사의 두께가 1.5 m까지 발생하여도 건물의 유리창이 파괴되지 않은 경우도 있다. 이렇게 피해규모가 다양한 이유는 토석류의 흐름 및 그 특성이 지형, 물성치 뿐 아니라 다양한 조건에 의해 영향을 받는다는 것을 뜻한다. 산지의 경사도와 강우 강도에 따라 토석류 발생확률을 예측하지만 그 예측의 정확도가 낮은 실정이며, 특히 토석류가 도심지에서 발생하는 경우 급경사면을 따른 빠른 전파 속도로 인해 큰 인적·물적 피해를 야기한다. 관련 연구로는 Kim¹⁾의 연구에서 흐름면의 경사를 10°, 15°, 20°인 수로에서 토석류 실험을 수행하였다. 토석류 실험 결과 수로경사가 증가할수록 급격하게 붕괴에 필요한 유량이 증가하였고 붕괴가 발생되면 더 급격하게 흐르는 것을 확인하였다. Corominas²⁾은 산지의 경사에 따른 전파길이의 특성을 연구하였다. 발생된 토석류 자료를 기반으로

† Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-2-325-2332, E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hongik University, 94, Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

사면의 높이와 길이를 통해 토석류의 전파길이에 대한 실험식을 제시하였다. 지형의 형태 외의 연구로는 May & Gresswell³⁾이 지형에 따른 토석류의 퇴적 및 흐름특성을 연구하였다. 지형의 특성 중 배수특성, 산불이력 등에 따른 토석류 흐름특성을 연구하였다. 그러나 흐름경사면의 각도 및 토석류 발생량에 따른 물리적 전파특성과 구조물에 미치는 취약성을 분석한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 토석류의 거동을 분석하고 사전에 위험도를 예측하기 위하여 다양한 영향인자 중 민감도가 큰 영향인자인 지형과 발생량에 초점을 맞추고, 흐름전파면의 경사도에 따른 전파거리, 두께 및 최대 유속을 분석하였다. 또한 수치모의 결과를 통해 토석류가 구조물에 미치는 충격력을 계산하여 파괴확률 개념에 기반한 취약도를 산정하였다.

2. 수치모형 구축

2.1 적용모형

본 연구에서 토석류의 거동을 모의하기 위해 사용된 FLO-2D는 미연방재난청에서 토석류모의를 위해 권장하고 있는 프로그램으로서 국내에도 토석류 수치모의에 자주 사용하고 있는 프로그램 중에 하나이다. FLO-2D는 2차원 격자기반 해석 모형이며 해석 결과가 다른 프로그램에서도 연동이 쉽다는 장점이 있다. 모델의 기본 가정사항으로는 정상류, 흐름시 정수압 분포, 정상류 저항방정식을 사용, 바닥은 침식이 이뤄지지 않는 단단한 바닥, 범람과 퇴적흐름에 제한이 없지만 장애물이 있으면 흐름이 멈춤 등이 있다. 해석에 사용되는 지배방정식은 다음과 같다⁴⁾.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i \quad (1)$$

$$S_{fx} = S_{bx} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{by} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \quad (3)$$

여기서, h : 토석류의 유동심, u , v : 유동심을 통해 산정된 x 방향과 y 방향의 이동속도, i : 강우강도, S_{fx} , S_{fy} : x 방향과 y 방향의 마찰경사이다.

$$\tau = \tau_y + \tau_\nu + \tau_t + \tau_d = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (4)$$

여기서, τ_y : 항복전단응력, τ_ν : 점성전단응력, τ_t : 난류

전단응력, τ_d : 분산전단응력, η : 동점성 계수, C : 내부 전단계수이다.

식 (4)로 표현된 총 전단응력을 수심 적분하여 경사형식(gradient form)으로 표현하면 다음 식 (5)과 같다.

$$S_f = S_y + S_\nu + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (5)$$

여기서, S_y : 항복경사, S_ν : 점성경사, S_{td} : 난류-분산경사, γ_m : 유사혼합물의 비중량, K : 저항매개변수, n : 등가 Manning 계수 값이다.

2.2 모형의 검증

토석류의 물성치는 지형습윤, 토질의 종류, 입도분포 등 다양한 요인에 의해 달라지게 된다. 이러한 물성치에 대한 값을 실제 프로그램(FLO-2D)에 적용되는 물성치로 적용하기 위해선 다양한 요인이 고려된 물성치 값의 역해석이 필요하다. 이러한 물성치에 대한 조사를 위한 자료가 부족하여 본 연구에서는 USGS (2001)에서 수행한 모형수로 실험결과를 활용하여 토석류의 물성치를 역해석하여 검증을 수행하였다. USGS에서 수행한 실험재원은 수로 총 길이가 80 m, 수로 경사가 30°, 토석류 발생량이 10 m³이고 자세한 사항은 Fig. 1과 같다⁵⁾.

USGS 모의 결과와 전파길이와 전파속도를 비교하

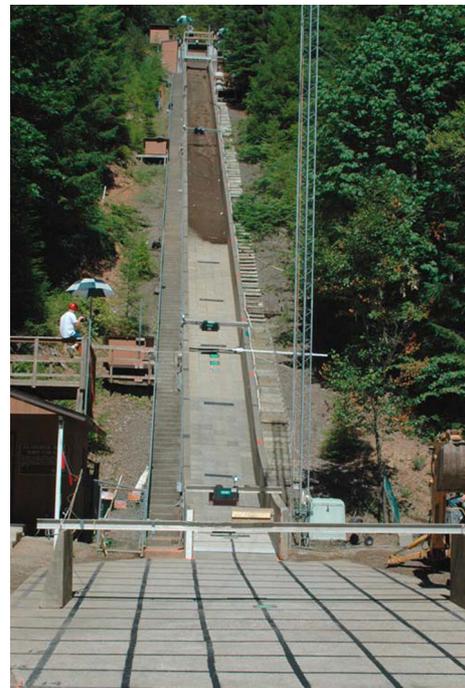
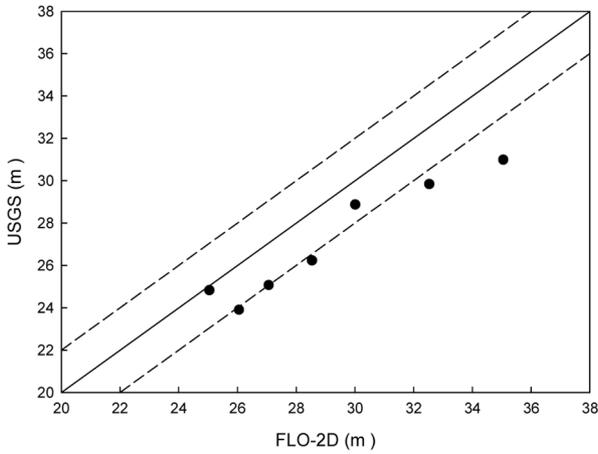
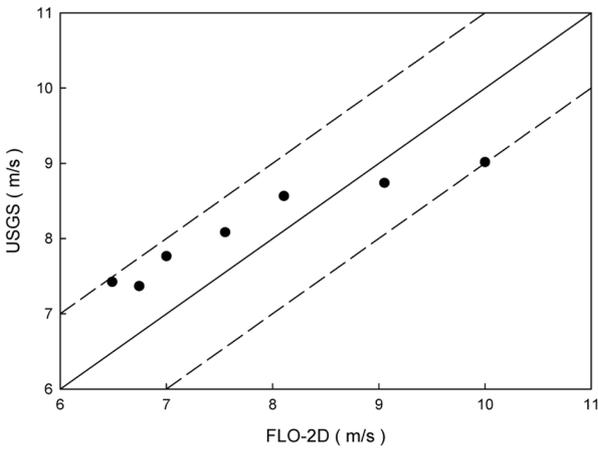


Fig. 1. Debrisflow experiment in USGS



(a) Length of debris flow



(b) Velocity of debris flow

Fig. 2. Comparisons between USGS experiment result and FLO-2D simulation result.

였으며, Fig. 2에서 그 비교 결과를 제시하였다. 비교한 결과 10% 이내에서 토석류의 거동이 비슷하게 흘러가는 값을 찾았으며 그 값을 대입하여 본 모의에 물성치 값을 사용하였다.

3. 경사도에 따른 토석류 전파의 물리적 특성

3.1 지형 및 입력자료 구축

토석류가 주로 발생하는 경사인 30°로 경사각을 선택하였으며, 토석류는 주로 계곡에서 발생된다는 점에 착안하여 역삼각(V)형 형상으로 흐름경사 단면을 구성하였다. 토석류 발생량은 0 ~ 10,000 m³ 범위 내로 변화시켜 모의를 수행하였다. 토석류의 물성치는 USGS 모의에서 가장 모의를 잘 반영한 물성치가 실제 토석류 흐름을 잘 반영한다고 가정하였고, 예비 모의에서 사용한 Table 1과 같은 물성치를 사용하였다. 물성치의

Table 1. Material properties of debris flow in this study

Properties	Value
Yield stress	8.87 poise
Viscosity	39.18 dynes / cm ²
Resistance parameters	500
Specific gravity	1.85
Sediment concentration (volume of sediment/volume of water plus sediment)	27%

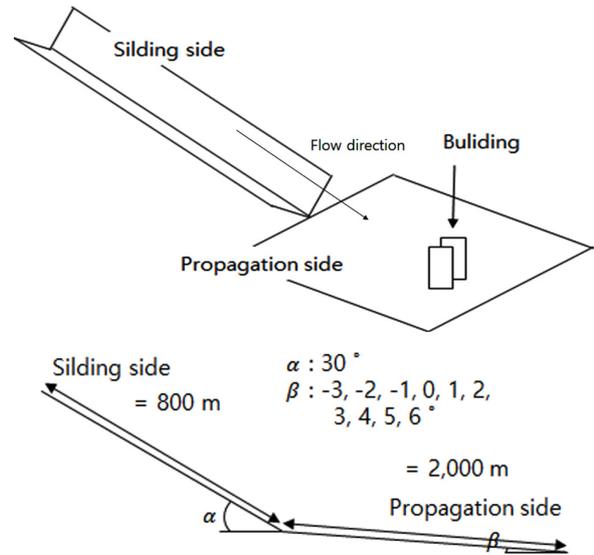


Fig. 3. Topography of simulation.

값은 우리나라의 주로 분포된 사질토의 특성 값을 참조하여 적용하였음. 전파면은 총 길이 2 km로 하였고 경사는 -3 ~ 10° 범위 내에서 1° 간격으로 변경하여 모의를 수행하였다.

수치모의 결과를 바탕으로 토석류 두께, 속도, 전파 길이 및 전파면적을 분석하였다. 토석류 두께 및 속도는 100 m 간격으로 단면의 결과 값을 추출하여 그 단면 결과의 평균값으로 활용하였다. 본 연구에서 토석류의 전파길이는 전파면에서 흐름방향으로 가장 멀리 나간 지점에서 전파면이 끝나는 지점까지 거리로 정의하였고, 전파면적은 전파면(propagation surface side)에서 전파된 면적을 계산하여 나타내었다.

3.2 최대 전파 길이

최대 전파 길이는 토석류의 발생량과 전파 길이로 표현하였으며 전파면의 경사에 따른 차이를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 전파면의 경사가 급해질수록, 토석류 발생량이 증가할수록 전파길이가 증가하였으나. 경사도와 발생량이 커질수록 토석류 전파길이의 증가폭은

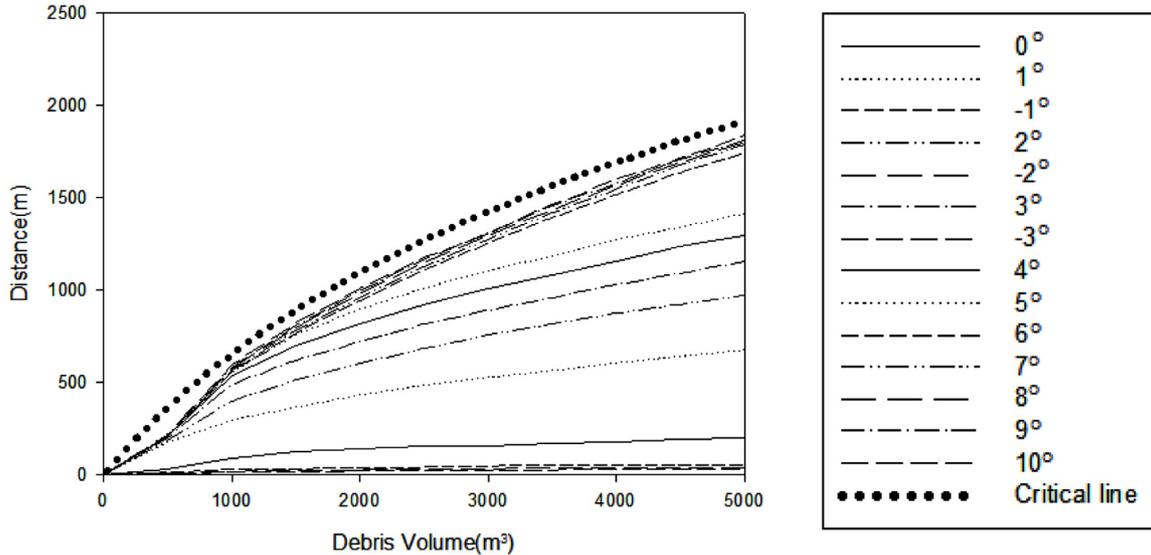


Fig. 4. Distance of debris flow with Debris volume.

점점 감소하는 것으로 나타났다. 전파길이는 역경사일 경우에 역경사도 따라 토석류 전파길이의 감소율이 크게 차이나는 것은 볼 수 없었다. 발생량이 2000 m³ 이상으로 커짐에 따라 전파길이의 경향이 크게 갈리게 되며 발생량이 더 커지더라도 경향의 변화는 크게 변하지 않는 특징을 보인다. 경향이 수렴하는 지점을 임의의 곡선으로 가정하여 최종임계곡선으로 표현하여 토석류의 전파길이의 수렴구간을 표시하였다.

Fig. 5에서 전파면의 경사와 전파 길이의 관계를 토석류 발생량에 따라서 표현하였으며 그 특징은 다음과 같다. 전파길이의 증가는 경사각 6°를 지나면서 경사가 더 급해지더라도 전파길이의 증가율이 감소하여 최종 임계곡선에 근접하는 특징을 확인할 수 있었다. 또한 역경사일 경우에도 -1°를 지나면서 경사가 더 급해지더라도 전파길이의 감소율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 토석류 발생량이 1000 m³에서 3000 m³으로 발생량이 2000 m³가 증가 할 때마다 최대 전파길이는 약 1000 m정도 증가하는 것을 분석할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 전파면의 경사와 발생량이 예측이 된다면 토석류가 어느 정도 전파할 것인지에 대한 예측을 수행하는데 도움을 줄 것이다.

Fig. 5에서 모의결과를 활용하여 분석한 결과를 S1, S2, S3로 표현하였다. S1, S2, S3는 발생량 및 경사도에 따라 변하는 전파거리가 일정 값으로 수렴하는 지점을 통과하는 Table 2와 같은 직선을 나타낸다. 경사가 급격히 증가하는 구간은 토석류의 거동이 활발하게 발달되는 구간이고 경사가 완만해지는 구간은 토석류의 거동이 수렴하는 구간으로 볼 수 있을 것이다. 경사가 변

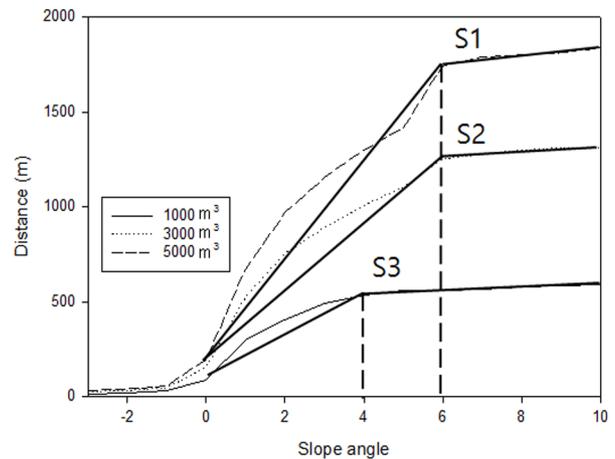


Fig. 5. Length of debris flow with slope angle.

하는 지점은 S1, S2의 경우 전파면의 경사가 6°인 반면 S3의 경우 경사가 4°인 특징이 있었다. 이러한 특징을 통해 토석류 발생량이 3000 m³ 이상일 때 토석류 거동의 수렴이 발생하는 전파면의 경사가 같아진다고 추론해볼 수 있었다. 또한 경사가 완만해 지는 구간인 토석류 거동 수렴 구간은 토석류 발생량이 많아 길수록 경사가 커지는 것으로 분석되었다.

이러한 결과 값은 해석 노드별로 토석류의 두께가 기록된 자료를 활용하여 분석하였다. 토석류의 두께가 존재하는 노드를 추출한 뒤 흐름방향의 최전방에 위치한 노드의 위치 값을 읽어 최대 전파길이를 분석하였다.

S1, S2, S3은 대략적인 토석류의 흐름을 볼 수 있기에 토석류 흐름을 간단히 파악할 수 있고 방재를 위한 자료로서 활용할 수 있을 것이다.

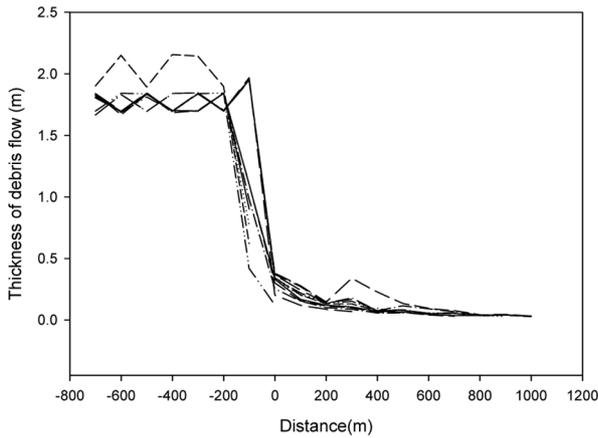
Table 2. Analysis result that length of debris flow with slope angle

Volume of debris flow	Line type	Slope angle of changing line angle	Line angle
1000 m ³	S1	4°	50.0° / 6.5°
3000 m ³	S2	6°	38.0° / 4.5°
5000 m ³	S3	6°	26.5° / 3.0°

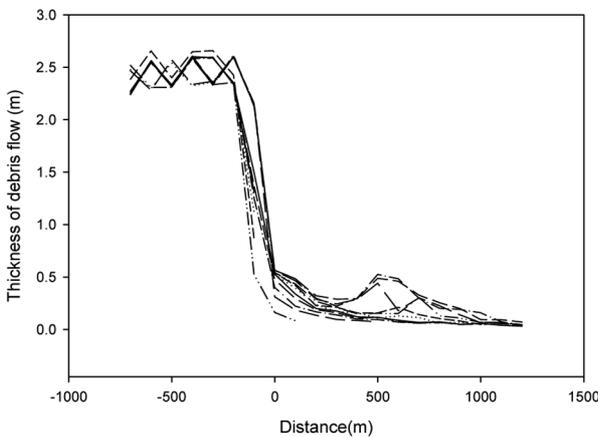
3.3 최대 두께 및 속도

토석류의 최대 두께 및 속도는 토석류 전파길이에 따른 토석류의 두께와 속도를 비교하였으며 각 경사별 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에서 제시하였다.

토석류 발생량이 5000 m³ 증가함에 따라 흐름면에서 1 m 정도 두께가 증가하였고 역경사일 경우 흐름면의 토석류 두께가 증가하는 경향을 보였다. 또한 경사가 순경사로 감에 따라 순경사일 때 토석류 두께가 경향을 나타냈으며 이러한 경향은 토석류 전파 길이에 따라 두께의 정도가 결정되는 것을 확인할 수 있었다.

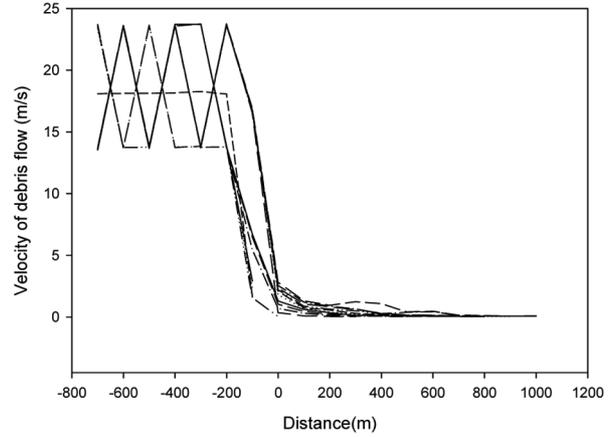


(a) Volume of debris flow, 5000 m³

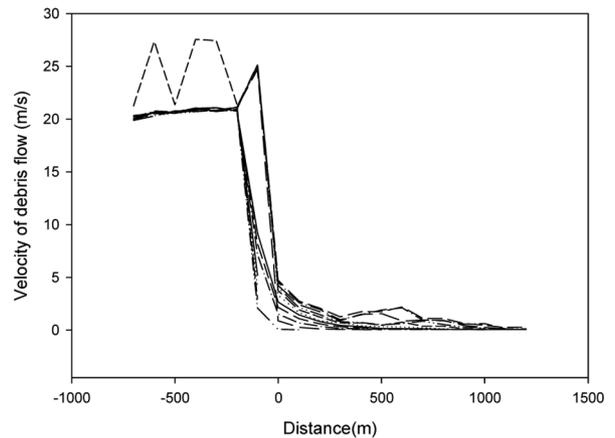


(b) Volume of debris flow, 10000 m³

Fig. 6. Thickness of debris flow with distance.



(a) Volume of debris flow, 5000 m³



(b) Volume of debris flow, 10000 m³

Fig. 7. Velocity of debris flow with distance.

토석류 속도는 토석류 두께와 비슷한 경향을 보이며 토석류 속도는 토석류 발생량이 2500 m³ 증가함에 따라 흐름면에서 5 m/s 정도 증가하는 경향을 보였고 순경사 일수록 흐름면의 토석류 속도의 변동 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 경사가 순경사로 감에 따라 토석류 속도가 빨라지는 경향을 나타냈으면 이것은 토석류 두께와 마찬가지로 토석류 전파길이에 영향을 받는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 경사면이 8° 이상이 되면 전파면에서 토석류 두께가 500 m 지점에서 0.1 m 이하로 두께가 증가하는 다른 경우보다 약 0.3 m 더 두껍게 흐름이 발생하는 특징이 있었다.

4. 취약성 분석

4.1 파괴확률 해석방법

Haugen (2008)이 미연방재난관리청(FEMA)가 개발한 재해관리시스템의 일부이며 HAZUS-MH라 불리는 방법을 활용하여 토석류에 대한 구조물 취약도를 분석

한 연구 중 일부를 발췌하였다. 취약도는 수평변위에 따른 파괴확률로 나타내며 파괴는 총 4단계로 구분하여 계산된다. 파괴를 분류하는 4단계는 Slight(대부분의 벽체에 실균열을 보이고 콘크리트 부분이 떨어지기 시작), Moderate(대부분의 벽체 표면에 균열이 발생하고 벽체 끝부분의 콘크리트가 파괴되기 시작), Extensive(부분의 벽체가 항복하여 큰 균열이 발생), Complete(구조물의 완전 파괴가 발생)로 나누게 되며 벽체에 큰 균열이 발생하는 Moderate 상태에 대해 분석을 수행하였다. 이러한 취약도를 분석하는 방법은 구조물의 형태에 따라 달라지게 되며 본 연구에서는 두 가지 구조물에 대한 취약도를 분석하였다. 구조물의 종류로는 주거구조물의 주요형태인 저층의 무보강 조적벽 건물(Unreinforced masonry concrete of low structure)과 고층의 무보강 조적벽 건물(Unreinforced masonry concrete of tall structure)로 나누었다. 취약도를 산정하는 식은 다음과 같다^(6,7,8).

$$P(ds/u_{max}) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{u_{max}}{\hat{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서, $\hat{S}_{d,ds}$: 평균 변위(median spectral displacement), β_{ds} : log-normal 평균표준편차(log-normal standard deviation), ds : 손상상태(probability of a certain damage state), u_{max} : 최대변위(spectral displacement), Φ : 표준정규누적분포함수(standard normal cumulative distribution function)

그리고 u_{max} 는 다음의 정수압 변위(u_{st})와 동수압 변위($u_{dy,max}$)의 합으로 구해진다.

$$u_{st} = \frac{P_{st}}{k} = \frac{p_{st}A}{k} = \frac{\rho_{df}gbh^2}{2k},$$

$$u_{dy,max} = R_{max} \frac{P_{dy,max}}{k} = \frac{\rho_{df}v^2A}{2\pi^2 m_{str}} T_n^2 \quad (7)$$

여기서, ρ_{df} : 토석류의 밀도, b : 토석류의 폭, h : 토석류의 높이, g : 중력가속도, $k = \frac{4\pi m_{str}}{T_n^2}$: 구조물 강성, v : 토석류의 유속, m_{str} : 구조물의 수직하중, $T_n = 0.075 \times H_{str}^{3/4}$: 구조물의 고유주기, H_{str} : 구조물의 높이, $R_{max} = \frac{u_{dy,max}(P_{dy,max})}{u_{st}(P_{dy,max})} = \frac{u_{dy,max}}{P_{dy,max}/k}$: 동하중에 의한 응답비(Constant=2)로 식 (8)과 같이 정의한다.

$$R_{max} = \left[\left(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{T} \right)^2 + \left(\sin 2\pi \frac{t_1}{T} \right)^2 \right]^{1/2}$$

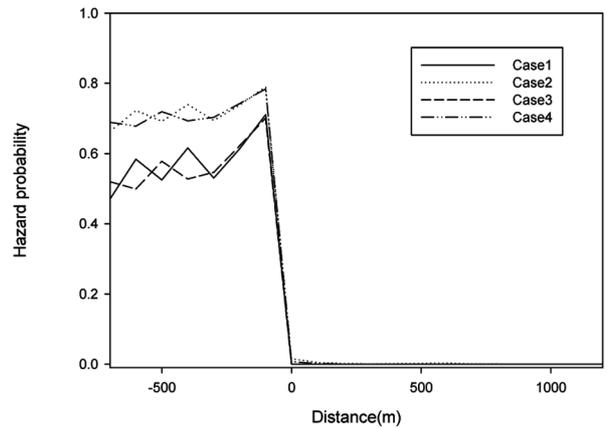
$$= \left[2 \left(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{T} \right) \right]^{1/2} = 2 \sin \pi \frac{t_1}{T}$$

(Clough, 1993) (8)

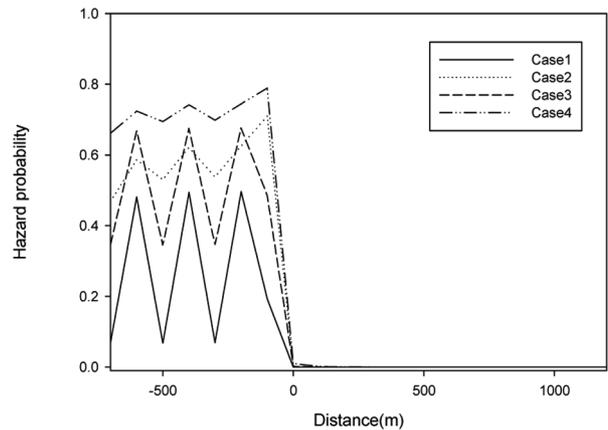
여기서, $0 < t_1/T < 1/2$ 이므로 R_{max} 는 2가 최대값이다.

4.2 토석류 유동에 의한 구조물 취약성 분석

토석류에 의한 구조물 취약성 분석결과를 통해 토석류 피해 범위를 정량적으로 예측할 수 있다. 토석류에 의한 구조물 취약성은 흐름면 경사가 완만해 짐에 따라 급격하게 파괴확률이 감소하는 것을 보였으며 취약성이 다르게 나타나는 두 구조물을 비교해 보았을 시에 취약성의 경향은 크게 차이를 보이지 않았다. 그러나 발생량이 증가함에 따라 취약성의 경향은 크게 차이가 났으며 순경사에서 역경사로 갈수록 취약성이 감



(a) Angle of propagation side, $\beta = 10^\circ$



(b) Angle of propagation side, $\beta = 6^\circ$

Fig. 8. Hazard probability with distance.

Table 3. Legend of Fig. 8

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Volume of debris flow	5000 m ³	10000 m ³	5000 m ³	10000 m ³
Structure type	Unreinforced masonry concrete of tall structure	Unreinforced masonry concrete of low structure	Unreinforced masonry concrete of tall structure	Unreinforced masonry concrete of low structure

소하는 경향을 보였다.

흐름면에서는 파괴확률이 약 20% 차이가 발생하였고 전파면에서는 0.8%정도 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 흐름면이 끝나는 -200 m 전부터 급격하게 파괴 확률이 증가하였고 -100 m 전부터 파괴확률이 1% 이하로 떨어지는 경향을 보였다. 파괴확률이 급격하게 감소하는 이유는 전파면이 곡선형태로 부드럽게 변화하게 되지 않고 직선 형태로 각도만 변화는 형태이기 때문에 에너지가 급격히 경사 변화부에서 소실되는 것으로 설명할 수 있을 것이다. 에너지가 급격히 감소하는 현상을 이용하여 방재시설에 활용한다면 토석류의 진행을 막거나 저감할 수 있을 것이다. 토석류 두께와 속도가 경사면을 끝나가며 최대값을 갖는 흐름을 보였다. 취약성 분석을 수행한 결과에도 마찬가지로 경사면이 끝나는 -200 ~ 0 m 구간에서 취약성이 최대값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

전파면 경사 6°에 발생량이 5000 m³일 때 토석류의 속도와 두께의 변동 폭이 커 취약성 또한 큰 범위로 변화하는 것을 살펴볼 수 있었다. 이러한 현상은 수치계산의 오류로 볼 수 있을 것이다. 이러한 오류는 흐름이 수로형태로 구성되어 있고 특히 역삼각(V)형이기 때문에 흐름이 일정한 한 방향으로 흐르지 않고 수로의 중간으로 쏠리는 흐름 형태를 보이는 형상으로 발생하는 것으로 판단된다. 이 프로그램 상에서 흐름방향이 8방향으로 국한되어 있어 흐름 방향이 8방향 외의 다른 방향으로 쏠리는 흐름에 대한 모의가 제대로 이뤄지지 않는 한계점 때문이라 생각한다.

5. 결론

본 연구에서는 수치모의를 통하여 전파면의 경사도에 따른 토석류 흐름 특성을 검토하였다. 토석류 흐름의 특성 중 전파길이와 전파면적이 경사도에 따라 민감하게 변화하였으며, 이는 토석류 두께와 속도에 도 경사도에 따라 변화하는 경향을 확인할 수 있었다. 전파면 경사 6° 이상이 되면 토석류의 전파길이의 증가율이 감소하는 것을 확인하였고 토석류 발생량 2000 m³이 이상 발생할 때도 토석류 전파길이의 증가율이 일정하게 수렴하는 것으로 분석할 수 있었다. 이와 같은

경사도에 따른 토석류 발생의 특성은 후에 전파면에 위치한 구조물이나 방재대책을 수립하는 설계기준으로 활용할 수 있을 것이다. 그러나 발생량이 작거나 전파면 경사가 낮은 구간 또는 발생량이 크거나 경사가 급한 구간에서는 토석류 거동이 일정한 경향에서 벗어나는 분석결과를 보여주고 있어 수치모델 상 내제된 한계에 기인한 것으로 생각된다. 이러한 수치오차는 역삼각(V)형 수로에서 수로의 중심으로 흐름이 쏠리는 현상으로 토석류의 흐름방향이 중력에 의한 흐름방향 아닌 수로의 중심 방향으로 발생한다고 추론하였다.

토석류 속도와 두께 그리고 구조물의 특성 값을 통해 산정된 토석류에 의한 구조물 취약성은 지형에 따라 구조물이 안전하게 위치할 수 있는 지역을 선정하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 또한 역경사 존재 시 토석류가 거의 전파되지 못하는 것으로 보아 토석류의 흐름을 돌리거나 저류하는데 역경사 지형이 방재에 효과가 있는 것도 확인 할 수 있었다. 전파면의 경사에 따른 토석류 흐름 특성 값을 통해 토석류 흐름에서 가장 민감하다고 볼 수 있는 지형에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과 흐름면 경사가 완만해 짐에 따라 취약성이 급격히 감소하고, 대상 구조물의 높이에 대해서는 상대적으로 영향이 미미하였다.

향후 연구에서는 토석류의 흐름이 수로의 중심으로 집중되지 않는 직사각형 수로를 대상으로 모의를 수행하고, 실제 도심지 지형에서 발생한 토석류의 흐름특성과 비교하고자 한다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(13SCIPS04 연구사업)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) N. J. Kim, "Occurrence Characteristics of Channelized Debris Flow by the Hydraulic Experiments", Gangneung-Wonju National University, 2014.
- 2) J. Corominas, "The Angle of Reach as a Mobility Index for Small and Large Landslides", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No.2, pp. 260-271. 1996.

- 3) C. L. May and R. E. Gresswell, "Spatial and Temporal Patterns of Debris-flow Deposition in the Oregon Coast Range", USA, *Geomorphology*, Vol. 57, Issues 3-4, pp. 135-149, 2004.
- 4) O'Brien, J. S. "FLO-2D user's Manual, Version 2006.01. FLO Engineering: Nutrioso", 2006.
- 5) R. M. Iverson, M. Logan, R. G. LaHusen and M. Berti, "The Perfect Debris Flow? Aggregated Results from 28 Large Scale Experiments, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*", Vol. 115, No. F3, 2010.
- 6) E. D. Haugen and A. M. Kaynia, "Vulnerability of Structures Impacted by Debris Flow", *Landslides and Engineered Slopes*, Taylor & Francis, London, Vol. 1, pp. 381-387, 2008.
- 7) W. I. Choi, S. G. Lee, B. K. Lee and S. J. Jang, "A Study of Vulnerability of Structure by Debris Flow, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*", Vol. 12, Issue 3, pp.141-146, 2012.
- 8) HAZUS-MH, F. E. M. A. "Flood Model: Technical Manual", Federal Emergency Management Agency, 2013.